

非垂直激光切割能量分布研究

欧长劲, 秦才宝, 姜献峰, 董星涛

浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014

摘要 为实现激光非垂直切割高分子材料,建立了激光非垂直切割模型。通过求解阈值能量方程,得到切缝宽度和热影响区(HAZ)宽度随激光线能量、入射角和离焦量的变化规律。在CO₂连续激光切割系统上,采用正交试验法,针对聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜材料进行切割试验,发现入射角在 $-57.3^{\circ}\sim 57.3^{\circ}$ 范围内、离焦量在 $-15\sim 15$ mm范围内时,切缝宽度和HAZ宽度变化平缓,切割质量良好。结果表明,模型能够很好地预测激光非垂直切割高分子材料时的切缝宽度和HAZ宽度,为激光切割复杂曲面膜片提供了参数指导。

关键词 激光技术; 激光线能量切割模型; 非垂直激光切割; 曲面膜片

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.041407

Study on Energy Distribution of Non-Vertical Laser Cutting

Ou Changjin, Qin Caibao, Jiang Xianfeng, Dong Xingtao

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract In order to realize non-vertical laser cutting of polymer materials, a non-vertical laser cutting model is established. The change laws of kerf width and heat affected zone (HAZ) width with the laser line energy, the incident angle and the defocusing amount are obtained by solving the threshold value energy equation. In the continuous CO₂ laser cutting system, the cutting experiment is done on polyethylene terephthalate (PET) film with the orthogonal experimental method. It is found that the kerf width and the HAZ width change gently and the cutting quality is good when the incident angle is in the range of -57.3° to 57.3° and the defocusing amount is in the range of -15 mm to 15 mm. The results show that this model can accurately predict kerf width and HAZ width in non-vertical laser cutting of polymer materials, which provides parameter guidance in laser cutting of complex films with curved faces.

Key words laser technique; laser linear energy cutting model; non-vertical laser cutting; film with curved face

OCIS codes 140.3460; 140.3470; 140.3390; 310.3840

1 引言

现代模塑制品为了追求外型美观、安全,大量使用曲面造型。传统冲压模工艺在切割复杂曲面时束手无策,而激光可适用于复杂曲面膜片的切割。如果可以实现激光束光轴和材料表面的非垂直切割,就可以降低切割成本,如采用三轴数控切割。利用激光非垂直切割高分子材料如聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)膜片时,关于激光功率、切割速度、入射角和离焦量等工艺参数与切缝宽度、热影响区(HAZ)宽度之间定量关系的研究鲜有报道。

鉴于激光切割中的物理过程比较复杂,国内外学者通过建立数学模型进行了多种研究。针对金属材料,陈继民等^[1]研究了激光非垂直切割中入射角对切割质量的影响,结果表明,在入射激光光束不垂直于工件表面时,切缝宽度取决于工件吸收的能量和入射点的光斑直径。Mullick等^[2]利用光纤激光对4 mm厚不锈钢板进行切割,获得了激光入射角对切割质量的影响,指出正的激光入射角更有利于提高激光吸收率,且热传导损失更少。Chen等^[3]利用人工神经网络优化了激光非垂直切割低碳钢时激光输入参数对切割质量的影响。王昆林^[4]从求解激光加热的热传导微分方程入手,建立了激光焊接和切割黑色金属、有色金属等的数学

收稿日期: 2016-11-30; 收到修改稿日期: 2016-12-08

作者简介: 欧长劲(1956—),男,硕士,教授,主要从事膜内装饰技术、膜片切割方面的研究。E-mail: ou_cj@163.com

模型。孟庆轩等^[5]基于气熔比建立了薄板激光切割模型,模拟了激光切割铝合金薄板时,在不同功率和扫描速度下的气熔比值和残留熔融层厚度。陈宇翔等^[6]使用掺钕钇铝石榴石激光切割高温合金钢,研究了氧气气压、离焦量、加工速率、输入电流、脉宽、频率对激光切割质量的影响,发现正交法可以优化挂渣厚度,但对切缝宽度无优化作用。张威等^[7]采用 1 kW 光纤激光器对 2 mm 厚铝锂合金板进行切割试验,初步探讨了离焦量、辅助气体压力、激光功率和切割速度对切割质量的影响,深入研究了连续激光模式与脉冲激光模式下的切割质量差异,结果表明脉冲模式下切缝挂渣少、粗糙度小。针对非金属材料,有学者建立了 CO₂ 激光切割高分子材料的切割深度模型。谢小柱等^[8]根据输入输出能量守恒定律,建立了高吸收率非金属材料切割深度和线能量之间的关系。陈华等^[9]根据 CO₂ 激光束加热亚克力等材料的实际情况,建立了连续激光辐照非金属材料的数学模型。姜新波等^[10]采用固体脉冲激光器,研究了激光能量、进给速度及切缝深度对厚度为 2 mm 的核桃楸、柞木、水曲柳及黄波罗板材切缝加工质量的影响,试验结果表明,当脉冲激光频率为 20 Hz、激光能量为 300 mJ、切缝长度为 12 mm 时,核桃楸切缝表面的加工质量最好。

现有的研究主要集中在垂直切割,而对于非垂直切割,关于激光切割线能量对切割质量影响的数学模型的研究较少。本文针对连续 CO₂ 激光加工高分子材料的过程,分析在非垂直切割的情况下,激光输入参数和切割质量之间的关系,为基于能量分布的激光非垂直切割工艺提供一定参考。

2 激光切割模型

材料能否被激光烧蚀切开,主要由材料吸收的线能量和材料的烧蚀阈值之间的大小关系决定。从能量在待切割材料(如 PET)表面的分布情况出发,建立非垂直激光切割的数学模型。

2.1 假设条件

- 1) 忽略激光壁聚焦和多重反射效应;
- 2) 忽略切割过程中的热对流、热辐射和热传导损失;
- 3) 忽略材料对 CO₂ 激光吸收率的变化,设 PET 材料对激光的综合吸收率为 0.5^[11];
- 4) 材料各向同性、均匀分布,连续 CO₂ 激光沿着 x 轴正向以恒定速度 v 运动。

2.2 激光垂直切割模型

激光垂直切割模型如图 1 所示^[12]。垂直切割模型中, z 轴与激光束中心重合(图 1 中为垂直纸面向外),激光光束以速度 v 沿着 x 轴正向运动,产生宽度为 d 的切缝,HAZ 宽度为 d_{HAZ} , y 轴与待切平面平行,待切膜片表面能量呈高斯分布。鉴于激光以一定的速度运动,可以利用线能量^[13]来描述单位时间内能量输入的大小。

图 1(a)中切缝能量阈值表示激光恰好能够垂直切开膜片时的线能量值,HAZ 能量阈值表示此时激光的线能量恰好对膜片表面有明显影响,即在显微图下有明显烧灼迹象,如图 1(b)中 PET 膜显微图所示。

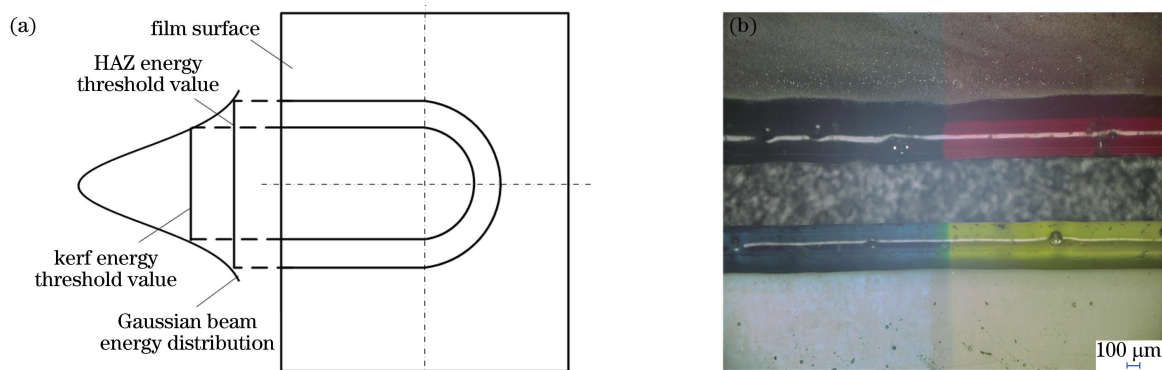


图 1 (a)激光垂直切割与截面能量分布示意图;(b)激光垂直切割 PET 膜显微图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of vertical laser cutting and cross-sectional energy distribution;

(b) microscopic image of vertical laser cutting of PET film

2.3 高斯光束沿光轴各截面的线能量分布

CO₂ 激光器产生的高斯光束经过三个反射镜和一个薄透镜传播到材料表面,其中反射镜用来改变光束

传播方向,薄透镜用来聚焦高斯光束的能量。根据麦克斯韦方程组及参考文献[14],可以得到高斯光束的电场分布 $E(x, y, z)$ 为

$$E(x, y, z) = \left[\frac{2}{\pi w^2(z)} \right]^{1/2} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} - ikz - \frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda R(z)} + i\Phi_0 \right], \quad (1)$$

式中 λ 为波长, $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$ 为光束半径, w_0 为光斑半径, $z_R = \pi w_0^2/\lambda$ 为瑞利距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $\tan \Phi_0 = \lambda z / (\pi w_0^2)$, $R(z) = z \{1 + [\pi w_0^2 / (\lambda z)]^2\}$ 为波阵面曲率半径。

根据文献[15]可知,任意截面的激光功率正比于电场分布强度模的平方,则高斯光束沿传播方向的功率表达式为

$$P(x, y, z) = P_{\text{tot}}(x, y, z) \frac{2}{\pi w^2(z)} \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2(z)} \right], \quad (2)$$

$$P_{\text{tot}}(x, y, z) = \pi w_0^2 P_{\text{av}}, \quad (3)$$

$$P_v = \frac{P_{\text{av}}}{v}, \quad (4)$$

$$P_{\text{vact}}(x, y, z) = \frac{P(x, y, z)}{v}, \quad (5)$$

式中 $P(x, y, z)$ 为高斯光束任意一点的功率, $P_{\text{tot}}(x, y, z)$ 为高斯光束任意截面总功率, P_{av} 为连续激光器的平均功率, $P_{\text{vact}}(x, y, z)$ 为待切材料表面实际任意一点的激光线能量, P_v 为激光输入线能量, v 为激光切割速度。综合(2)~(5)式,可知激光器发出的基模高斯光束沿传播方向的线能量分布表达式为

$$P_{\text{vact}}(x, y, z) = \frac{2aP_v}{[1 + (z/z_R)^2]} \exp \left\{ -\frac{2(x^2 + y^2)}{w_0^2 [1 + (z/z_R)^2]} \right\}, \quad (6)$$

式中 a 为材料对激光的吸收率。

为了将 $P_{\text{vact}}(x, y, z)$ 进行数值可视化,可令 $r^2 = x^2 + y^2$, 其中 r 为离激光光轴的距离。借助 MATLAB 软件,得到线能量分布曲面图如图 2 所示,其中光斑半径 $w_0 = 0.4$ mm,材料对激光的吸收率 $a = 0.5$,激光平均功率 $P_{\text{av}} = 40$ W,切割速度 $v = 30$ mm/s。

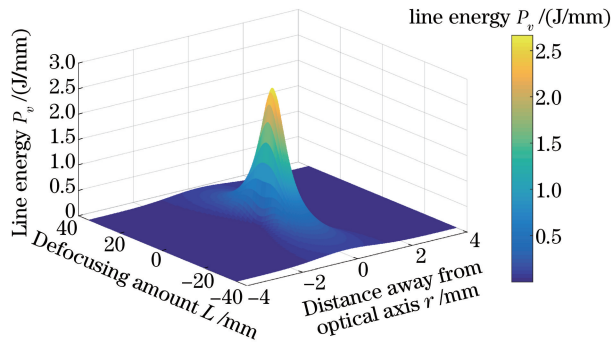


图 2 高斯光束沿光轴任意截面线能量分布曲面

Fig. 2 Line energy distribution of Gaussian beam at arbitrary cross section along optical axis

2.4 非垂直切割中材料表面线能量分布

材料在以光斑中心为原点的坐标系中的放置方式可分为水平放置和倾斜放置,当材料表面的法线与激光光轴不重合时,即为激光非垂直切割。可以从能量切割的角度按照非垂直切割方式对激光的垂直切割和非垂直切割建立统一的数学模型。

如图 3 所示,倾斜直线代表 PET 膜片表面,激光高斯光束从 z 轴正向辐射过来,辐照到 PET 材料表面,引起高分子材料燃烧,达到切割的目的。激光沿着 x 轴正向运动,图 3 中 x 轴正向为垂直纸面向外。基于 PET 膜片表面建立的参数坐标如图 4 所示,坐标原点 O 为激光光轴 z 轴与膜片的交点, x_1 轴与激光坐标系 x 轴平行, y_1 轴垂直于 x_1 轴,其正向沿着膜片表面且向与 z 轴成锐角的方向延伸。

基于膜片表面的参数坐标系,设膜片上任意一点的坐标为 (x_1, y_1) ,则在激光坐标系中该点可表示为

$$x = x_1, \quad (7)$$

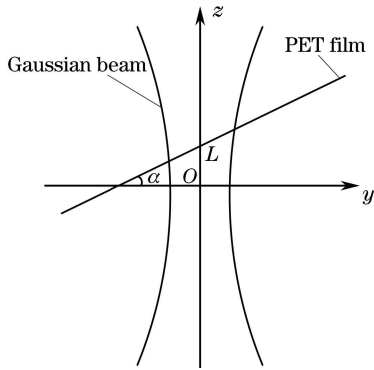


图3 非垂直激光切割示意图

Fig. 3 Schematic diagram of non-vertical laser cutting

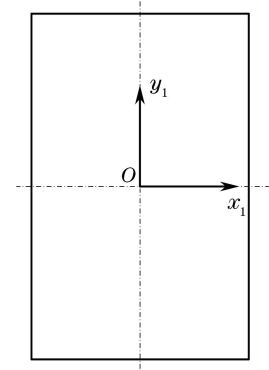


图4 PET膜片表面任意点参数

Fig. 4 Parameters of arbitrary point on surface of PET film

$$y = y_1 \cos \alpha, \quad (8)$$

$$z = y_1 \sin \alpha + L, \quad (9)$$

式中 α 为激光入射角, L 为离焦量。

将(7)~(9)式代入(6)式,得到基于膜片表面的激光能量分布为

$$P_{\text{vact}}(x_1, y_1, \alpha, L, P_v) = \frac{2aP_v}{1 + [(y_1 \sin \alpha + L)/z_R]^2} \exp\left\{-\frac{2(x_1^2 + y_1^2 \cos^2 \alpha)}{w_0^2 \{1 + [(y_1 \sin \alpha + L)/z_R]^2\}}\right\}. \quad (10)$$

2.5 线能量阈值平面

为了确定 PET 膜片是否具有稳定的烧蚀线能量阈值,进行 CO_2 激光试切割 PET 膜片试验。采用垂直入射方式,使用具有不同线能量的激光切割 PET 材料,以期获得具有理想切割质量的切缝。

采用表 1 所示的工艺参数切割 PET 膜片时,发现 PET 材料的烧蚀阈值趋向于一个稳定值。

表 1 激光切割工艺参数

Table 1 Parameters of laser cutting process

Number	Laser power P /W	Cutting speed v /(mm/s)
1	8	17
2	14	30
3	19	40

试验测得 PET 材料的烧蚀阈值约为 0.47 J/mm ,用 P_{vth} 来表示线能量阈值。欲使 PET 材料表面某区域被 CO_2 激光切割开,需要使该区域的能量分布满足

$$P_{\text{vact}}(x_1, y_1, \alpha, L, P_v) \geq P_{\text{vth}}. \quad (11)$$

(11)式在物理上的表现,就是某平面和 $P_{\text{vact}}(x, y, z)$ 曲面相交的交线所围成的区域都能被激光烧蚀切开。

同理,如图 1 所示,将恰好造成材料表面出现明显 HAZ 边界线时对应的线能量定义为 HAZ 线能量阈值,用 P_{vHAZ} 表示,即满足

$$P_{\text{vact}}(x_1, y_1, \alpha, L, P_v) \geq P_{\text{vHAZ}}. \quad (12)$$

PET 材料的 P_{vHAZ} 为 0.070 J/mm 。(12)式具有与(11)式相似的物理意义,此处不再赘述。

3 模型求解和分析

试验对象为 PET 薄膜,故可以采用激光光斑半径 $w_0 = 0.4 \text{ mm}$ 的 CO_2 激光切割系统。文献[8]测出 PET 材料对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长的 CO_2 激光吸收率较高,故选择波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光。(11)、(12)式是基于膜片表面的激光能量分布数学表达式,而能量密度在膜片表面的分布为椭圆,长轴在 y 轴上,切缝宽度就是椭圆长轴与 y_1 轴两个交点之间的宽度,故令 $x_1 = 0, \alpha, L, P_v$ 采用数值代入(11)、(12)式,解出一组 y_1 ,从而得到采用相应工艺参数烧蚀出的切缝宽度和 HAZ 宽度。

3.1 切缝宽度

切缝宽度的模型计算结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,当激光能量、离焦量恒定时,若激光入射角的

绝对值大于 1 rad (即 57.3°), 切缝宽度将随入射角绝对值的增大而急剧增大, 这是由于此时辐照到膜片表面的能量急剧增加。参考图 3 所示的激光能量分布, 实质上高斯光束能量衰减方式呈现指数型衰减。因此, 当入射角绝对值大于 57.3° 时, 切缝宽度急剧上升; 而入射角绝对值小于 57.3° 时, 切缝宽度变化相对平缓。

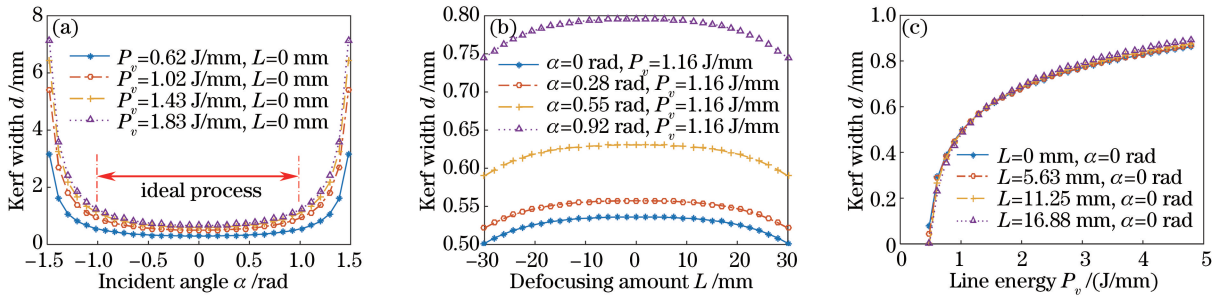


图 5 不同参数对切缝宽度的影响。(a)入射角;(b)离焦量;(c)线能量

Fig. 5 Influence of different parameters on kerf width. (a) Incident angle; (b) defocusing amount; (c) line energy

由图 5(b)可知, 当激光能量、入射角恒定时, 若离焦量 L 处于 $-15 \sim 15$ mm 区间, 切缝宽度几乎不受影响; 而当 $|L| > 15$ mm 时, 随着离焦量 L 绝对值的增大, 切缝宽度明显减小。这主要是由于离焦量绝对值过大时, 高斯光束的能量已经散失到空气中, PET 膜片无法集中吸收激光能量。

由图 5(c)可知, 当离焦量、入射角恒定时, 激光能量对切缝宽度的影响显著。当线能量 P_v 在 $0.5 \sim 2$ J/mm 范围内时, 切缝宽度随着线能量的增加而急剧增加; 当 $P_v > 2$ J/mm 时, 切缝宽度随线能量的增大趋势逐渐变缓。可以发现, 对横轴作垂线与曲线相交, 得到的纵轴值表征了离焦量对切缝宽度的影响。曲线的密集性表明离焦量对切缝宽度的影响不大, 印证了图 5(b)的模型预测。

3.2 HAZ 宽度

HAZ 宽度的模型计算结果如图 6 所示。由图 6(a)可知, 当激光能量、离焦量恒定时, 若激光入射角的绝对值大于 1 rad (即 57.3°), HAZ 宽度将随着入射角绝对值的增大而急剧增大, 这是由于辐照到膜片表面的能量急剧增加。

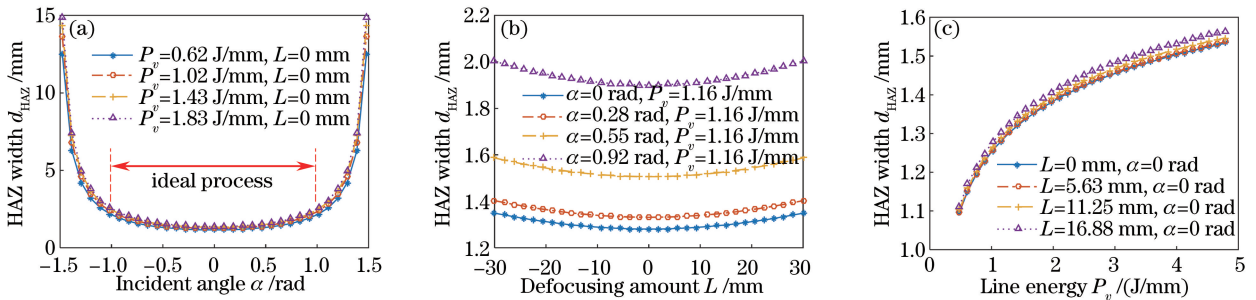


图 6 不同参数对 HAZ 宽度的影响。(a)入射角;(b)离焦量;(c)线能量

Fig. 6 Influence of different parameters on HAZ width. (a) Incident angle; (b) defocusing amount; (c) line energy

由图 6(b)可知, 当激光能量、入射角恒定时, 若离焦量 L 处于 $-15 \sim 15$ mm 区间, HAZ 宽度几乎不变; 而当 $|L| > 15$ mm 时, 随着离焦量 L 绝对值的增大, HAZ 宽度增加, 这是由于此时 PET 薄膜表面能被辐照到的区域在变大。这与切缝宽度随离焦量的变化趋势不一致, 主要是两者的线能量阈值及衰减速率不一致导致的。

由图 6(c)可知, 当离焦量、入射角恒定时, 激光能量对 HAZ 宽度影响显著。当线能量在 $0.5 \sim 2$ J/mm 范围内时, 切缝宽度随着线能量的增加而急剧增大; 当线能量 $P_v > 2$ J/mm 时, 切缝宽度随线能量的增大趋势逐渐变缓。可以发现, 对横轴作垂线与曲线相交, 得到的纵轴值表征了离焦量对 HAZ 宽度的影响。曲线的密集性表明离焦量对 HAZ 宽度的影响不大, 印证了图 6(b)的模型预测。

4 试验验证

4.1 试验方法

为了使线能量切割模型能够较为准确地描述实际工况,采用连续 CO₂ 封离式玻璃管激光器切割 PET 膜片,记录并比较试验结果。该设备由中国博业激光公司生产,型号为 HSLE-0906-W80CA,实际切割功率范围为 5~80 W,切割速度范围为 25~10000 mm/min。

针对模型中激光线能量 P_v 、入射角 α 和离焦量 L 三个因素互不相关的情况,采用正交试验方法进行试验。正交试验的水平和因素见表 2。

表 2 正交试验的水平和因素

Table 2 Levels and factors of orthogonal experiment

Level	Line energy P_v /(J/mm)	Incident angle α /rad	Defocusing amount L /mm
1	0.62	0	-5
2	1.97	0.55	0
3	3.32	1.10	5

4.2 试验结果

采用日本基恩士公司生产的 VHX-600E 数码显微镜测量得到切缝宽度和 HAZ 宽度,并与模拟结果进行对比,对比结果分别见表 3、4。通过对比表 3、4 发现,切缝宽度和 HAZ 宽度试验值与预测值之间存在一定误差,这主要是由于薄膜的激光吸收率随着入射角、离焦量等因素的变化而呈非线性变化,而模型预测时未将其完全计算在内。

表 3 切缝宽度的试验与模拟结果对比

Table 3 Comparison of experimental and simulation results of kerf width

Input parameters			Kerf width d / μm		Error w /%
Line energy P_v /(J \cdot mm ⁻¹)	Incident angle α /rad	Defocusing amount L /mm	Simulated value	Experimental value	
0.62	0	-5	287	275	4.4
0.62	0.55	0	344	323	6.5
0.62	1.10	5	644	602	7.0
1.97	0	0	676	653	3.5
1.97	0.55	5	797	752	6.0
1.97	1.10	-5	1520	1321	15.1
3.32	0	5	793	753	5.3
3.32	0.55	-5	933	851	9.6
3.32	1.10	0	1773	1489	19.1

表 4 HAZ 宽度的试验与模拟结果对比

Table 4 Comparison of experimental and simulation results of HAZ width

Input parameters			HAZ width d_{HAZ} / μm		Error w /%
Line energy P_v /(J \cdot mm ⁻¹)	Incident angle α /rad	Defocusing amount L /mm	Simulated value	Experimental value	
0.62	0	-5	1153	1066	8.2
0.62	0.55	0	1354	1183	14.5
0.62	1.10	5	2587	2168	19.3
1.97	0	0	1380	1266	9.0
1.97	0.55	5	1627	1483	9.7
1.97	1.10	-5	3104	2638	17.3
3.32	0	5	1475	1570	6.1
3.32	0.55	-5	1735	1631	6.4
3.32	1.10	0	3303	2883	14.6

图 7(a)、(b)分别为切缝宽度与 HAZ 宽度试验值与预测值的散点对比图,可以看出,随着激光入射角的增大,误差越来越大,这主要是由于 PET 材料对激光的吸收率随着入射角的增大而减小,而现有模型对吸收率作了近似处理。后续研究将着手拟合出吸收率随入射角变化的函数,进而修正数学模型以减小误差。

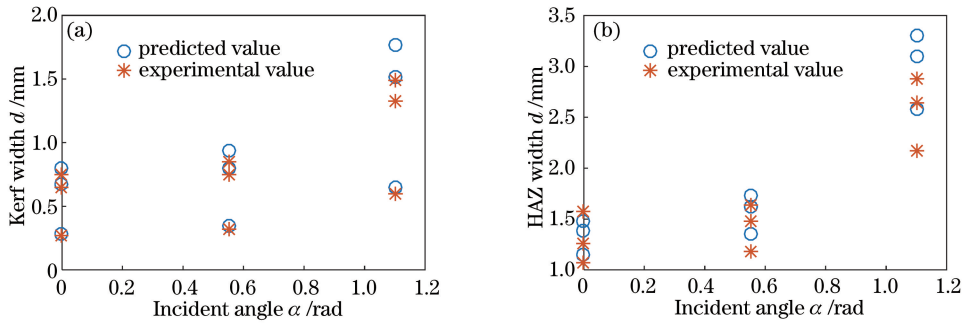


图 7 试验值与预测值对比。(a)切缝宽度;(b) HAZ 宽度

Fig. 7 Comparison of experimental and predicted value. (a) Kerf width; (b) HAZ width

正交试验中切割图片的放大图如图 8 所示,可以发现切口比较光滑,并且 HAZ 宽度随着入射角的增大而增大。另外图 8(b)、(c)中①侧比②侧的 HAZ 宽度要大,这主要是因为激光非垂直入射引起激光能量在膜片表面的分布不一致,导致能量分布呈椭圆状,而焦点偏向于①侧。

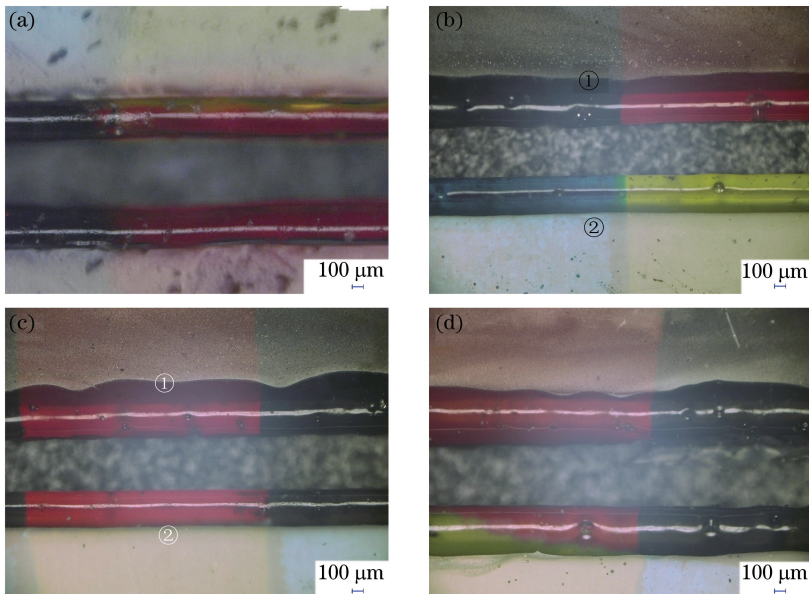


图 8 激光线能量、入射角和离焦量对切缝宽度和 HAZ 宽度的影响。(a) $P_v=0.62$ J/mm, $\alpha=0$ rad, $L=0$ mm;
(b) $P_v=0.62$ J/mm, $\alpha=0.55$ rad, $L=0$ mm; (c) $P_v=0.62$ J/mm, $\alpha=0$ rad, $L=5$ mm;
(d) $P_v=1.97$ J/mm, $\alpha=0$ rad, $L=0$ mm

Fig. 8 Influences of laser line energy, incident angle and defocusing amount on kerf width and HAZ width.

(a) $P_v=0.62$ J/mm, $\alpha=0$ rad, $L=0$ mm; (b) $P_v=0.62$ J/mm, $\alpha=0.55$ rad, $L=0$ mm;
(c) $P_v=0.62$ J/mm, $\alpha=0$ rad, $L=5$ mm; (d) $P_v=1.97$ J/mm, $\alpha=0$ rad, $L=0$ mm

模型预测结果基本反映了切缝宽度、HAZ 宽度的变化情况,同时通过以上的对比发现,模拟结果与试验结果基本吻合,说明激光线能量切割模型具有预见性。

5 结 论

利用连续 CO_2 激光非垂直切割非金属材料,发现试验结果与模拟结果基本吻合,验证了激光线能量非垂直切割模型的可行性。PET 薄膜的切缝宽度和 HAZ 宽度主要受激光输入线能量、入射角和离焦量的影响。入射角在 $-57.3^\circ \sim 57.3^\circ$ 、离焦量在 $-15 \sim 15$ mm 范围内时,切缝、HAZ 宽度变化平缓;超出该范围时,

切缝和 HAZ 宽度急剧变化。综上所述,基于能量分布构建的激光能量切割模型对预测切缝、HAZ 宽度具有理论指导价值,为数控控制激光非垂直切割曲面薄膜在选择工艺参数时提供了重要依据。

参 考 文 献

- [1] Chen Jimin, Zuo Tiechun. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(11): 1037-1041.
陈继民, 左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. 中国激光, 2001, 28(11): 1037-1041.
- [2] Mullick S, Agrawal A K, Nath A K. Effect of laser incidence angle on cut quality of 4 mm thick stainless steel sheet using fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 81(1): 168-179.
- [3] Chen J M, Yang J H, Zhang S. Parameter optimization of non-vertical laser cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(5): 469-473.
- [4] Wang Kunlin. Mathematical models of laser material processing[J]. Laser Journal, 1996, 17(3): 105-109.
王昆林. 激光材料加工的数学模型[J]. 激光杂志, 1996, 17(3): 105-109.
- [5] Meng Qingxuan. Vaporization-melt ratio mathematical model and experiments of laser cutting sheet metal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(17): 172-179.
孟庆轩. 薄板激光切割气熔比数学建模及试验验证[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 172-179.
- [6] Chen Yuxiang, Gao Liang. Analysis of processing parameters for laser cutting high-temperature alloy steel by orthogonal method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111403.
陈宇翔, 高亮. 正交法分析激光切割高温合金钢工艺参数[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111403.
- [7] Zhang Wei, Li Guozhu, Wang Chunming, *et al.* Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203003.
张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203003.
- [8] Xie Xiaozhu, Wei Xin, Hu Wei. Theoretical model of CO₂ laser cutting non-metal material[J]. Tool Engineering, 2008, 42(5): 19-20.
谢小柱, 魏昕, 胡伟. CO₂ 激光切割非金属材料理论模型[J]. 工具技术, 2008, 42(5): 19-20.
- [9] Chen Hua, Xue Shoulong, Hu Hong. Experimental and theoretical analysis of cutting packaging materials by laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 52(1): 011404.
陈华, 薛守龙, 胡泓. 包装材料激光切割数学建模与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 52(1): 011404.
- [10] Jiang Xinbo, Li Jinzhe, Bai Yan, *et al.* Laser cutting wood test and influencing factors of processing quality[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031403.
姜新波, 李晋哲, 白岩, 等. 激光切割木材试验及其加工质量的影响因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031403.
- [11] Holland B J, Hay J N. The thermal degradation of PET and analogous polyesters measured by thermal analysis-Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Polymer, 2002, 43(6): 1835-1847.
- [12] Du Hanbing, Liu Jianhua, Hu Xiyuan, *et al.* Methods of numerical calculation of the heat conduction loss in laser cutting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 72-77.
杜汉斌, 刘建华, 胡席远, 等. 激光切割热传导损失数值计算方法[J]. 机械工程学报, 2001, 37(5): 72-77.
- [13] Wang Di. Study on the fabrication properties and process of stainless steel parts by selective laser melting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
王迪. 选区激光熔化成型不锈钢零件特性与工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [14] Wei Lizhi. The properties of the Gauss beam laser[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
魏立志. 高斯光束的特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [15] Alda J. Laser and Gaussian beam propagation and transformation[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2003: 999-1013.